



**HAL**  
open science

# Modélisation multiéchelle "data driven" d'une poutre hétérogène élastique non linéaire

Noémie Jeannin, Fabien Ménard, Patrice Cartraud, Laurent Stainier

► **To cite this version:**

Noémie Jeannin, Fabien Ménard, Patrice Cartraud, Laurent Stainier. Modélisation multiéchelle "data driven" d'une poutre hétérogène élastique non linéaire. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280186

**HAL Id: hal-04280186**

**<https://hal.science/hal-04280186>**

Submitted on 10 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation multiéchelle "data driven" d'une poutre hétérogène élastique non linéaire

N. JEANNIN<sup>a</sup>, F. MÉNARD<sup>b</sup>, P. CARTRAUD<sup>c</sup>, L. STAINIER<sup>d</sup>

a, b, c, d. Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000  
Nantes, France,

a. noemie.jeannin@eleves.ec-nantes.fr

b. fabien.menard@ec-nantes.fr

c. patrice.cartraud@ec-nantes.fr

d. laurent.stainier@ec-nantes.fr

## Résumé :

*Pour des applications de type éolien flottant, les câbles électriques de transport d'énergie présentent un comportement non linéaire en flexion. Cependant la complexité de leur structure rend prohibitive l'utilisation de modèles éléments finis détaillés 3D. La mise en œuvre d'une méthode multiéchelle classique de type  $FE^2$  se heurte aux mêmes difficultés compte tenu de la nécessité d'un couplage fort entre les modèles micro et macro due à la non-linéarité du problème. Pour surmonter ces difficultés, nous proposons ici sur une approche multiéchelle pilotée par les données. Des premiers résultats sont présentés sur un problème simple.*

## Abstract :

*For floating wind energy applications, power transmission cables exhibit nonlinear bending behavior. However, the complexity of their structure makes the use of detailed 3D finite element models prohibitive. The implementation of a classical multiscale method such as  $FE^2$  faces the same difficulties due to the need for a strong coupling between micro and macro model which results from the problem non-linearity. To overcome these difficulties, we propose here a data-driven multi-scale approach. First results are presented for a simple problem.*

**Mots clefs :** multi-échelle, non linéaire, data-driven

## 1 Introduction

Nous nous intéressons ici à la modélisation d'un câble ombilical d'éolienne flottante : le câble délivrant l'énergie électrique produite par l'éolienne au réseau. Ce câble est principalement constitué de trois parties qui contiennent les fils conducteurs en cuivre et qui sont assemblées en hélice, de gaines en polymère et de deux couches d'armure hélicoïdales, comme présenté sur la Figure 1a. Son diamètre est de l'ordre d'une dizaine de centimètres alors que sa longueur est de plusieurs dizaines de mètres. Son comportement mécanique global peut donc être assimilé à celui d'une poutre. Compte

tenu du frottement entre les composants internes du câble, son comportement est non-linéaire, en particulier lorsqu'il est sollicité en flexion, comme illustré par la Figure 1b. Il est en effet possible de distinguer une phase initiale linéaire de contact collant, avec ensuite l'apparition d'un glissement qui va progressivement gagner toute la section du câble, pour conduire à l'obtention d'une raideur minimale. L'intensité des efforts de contact est par ailleurs affectée par les sollicitations axiales (traction-torsion) appliquées au câble et dépend ainsi de l'historique du chargement.

Dans les logiciels de calculs spécialisés actuels, la réponse temporelle du câble à différents états de mer s'obtient par un modèle poutre qui ne prend pas en compte le couplage flexion-tension.

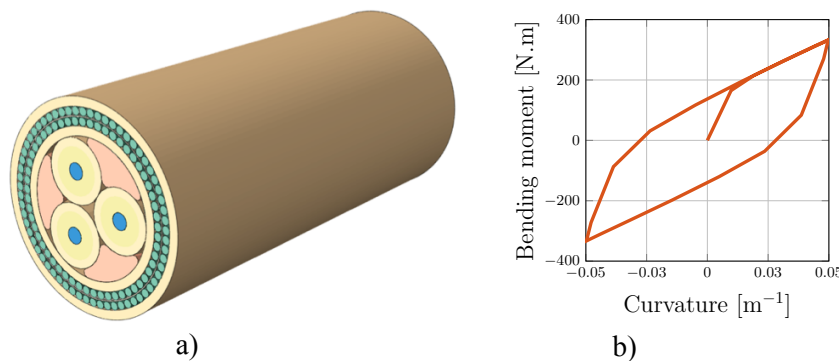


Figure 1 : schématisation du câble (a) et comportement non-linéaire en flexion (b)

Étant donné la non linéarité du comportement du câble, un couplage fort de type FE<sup>2</sup> est nécessaire entre le modèle poutre global et un modèle fin local 3D, ce dernier permettant d'obtenir le comportement global du câble de façon précise, en tenant compte de la complexité de sa constitution. Cela conduit cependant à des temps de calculs prohibitifs. Nous proposons donc pour contourner cette difficulté de développer une approche multi-échelle pilotée par les données (voir [1-3]) étendue au cas de poutres hétérogènes élastiques non linéaires dont le comportement dépend de l'histoire du chargement.

## 2 Développement d'une approche data-driven

### 2.1 Obtention des données par homogénéisation

Dans une première étape, les données, qui correspondent au comportement global du câble sont obtenues par homogénéisation. A ce stade les propriétés de symétrie hélicoïdale de la structure sont exploitées pour réduire le domaine de calcul à un tronçon axial du câble, cf. Figure 1a, sur lequel seront appliquées des conditions aux limites périodiques sur les sections extrêmes. Les détails de l'approche d'homogénéisation sont décrits dans [4]. La mise en œuvre de cette approche dans le cas d'une déformation macroscopique imposée de type courbure conduit à un comportement global comme illustré Fig. 1b.

### 2.2 Mise en place de la résolution data-driven pour une poutre non-linéaire

Le principe de l'approche data-driven, généralement appliquée à des milieux 2D ou 3D, est de résoudre le problème aux limites de mécanique en conservant les équations d'équilibre et de comptabilité et en prenant en compte le comportement du matériau à travers une base de données

d'états mécaniques déformations-contraintes, cf. par exemple [1]. La solution est alors déterminée en cherchant l'état mécanique qui est le plus proche d'un point de la base de données, avec une distance qui est définie au sens de l'énergie.

Dans notre cas, cette approche est utilisée pour une structure, qui présente un comportement global de type poutre, dont les états mécaniques sont donc de type déformations de poutre-contraintes intégrées, et obtenus numériquement à partir de l'approche d'homogénéisation décrite section précédente.

Pour simplifier le problème et dans une première étape, un comportement 1D est considéré, à savoir celui associé à la seule flexion de la poutre. De ce fait, il est possible de reprendre le formalisme présenté dans [5] pour l'analyse de treillis à comportement élastoplastique.

C'est ainsi que le comportement en flexion de la structure est approché par une représentation de type bi-linéaire avec retour élastique, et une base de données telle que présentée Figure 2 :

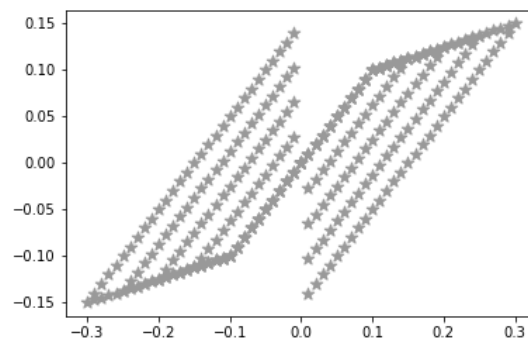


Figure 2 : base de données moment courbure

La résolution incrémentale du problème permet de tenir compte de l'histoire du chargement, dans la mesure où un état mécanique à l'instant  $t+\Delta t$  dépend de celui obtenu à l'instant  $t$  et de l'évolution du chargement.

## 2.3 Premiers résultats

Un exemple de poutre console est considéré. L'effort à l'extrémité de la poutre évolue en fonction du temps. Il atteint une valeur maximale qui permet de dépasser le domaine de réponse élastique, puis il est ramené à 0.

Le problème est résolu en utilisant un maillage avec deux éléments poutre avec deux points d'intégration par élément. La Figure 3 ci-dessous présente l'ensemble des couples moments courbures obtenus pendant la résolution. Il peut ainsi être vérifié que la solution correspond bien aux états contenus dans la base de données. D'autre part la phase de retour élastique lors de la décharge est également bien reproduite.

## 3 Conclusion

Un travail préliminaire a été réalisé pour implémenter et valider une approche de type data-driven à une poutre non-linéaire en flexion. Le problème a été simplifié par rapport à l'application visée et la prochaine étape va consister à considérer l'influence de la déformation d'extension de la poutre sur la non-linéarité de son comportement en flexion. Outre le fait qu'on sort du cadre d'un problème 1D, ce couplage rend également plus difficile la prise en compte de la dépendance à l'histoire du chargement.

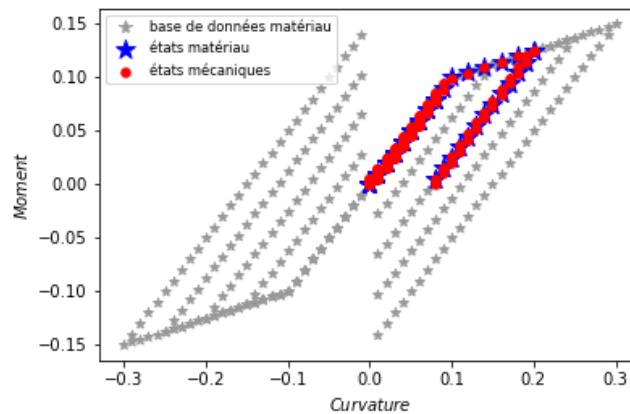


Figure 3 : états mécaniques obtenus lors de la résolution

## Références

- [1] T. Kirchdoerfer and M. Ortiz, “Data-driven computational mechanics,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 304, pp. 81–101, 2016.
- [2] R. Eggersmann, T. Kirchdoerfer, S. Reese, L. Stainier, and M. Ortiz, “Model-free data-driven in-elasticity,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 350, pp. 81–99, 2019.
- [3] J. Mora-Macías, J. Ayensa-Jiménez, E. Reina-Romo, M. Doweidar, J. Domínguez, M. Doblaré, and J. Sanz-Herrera, “A multiscale data-driven approach for bone tissue biomechanics,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 368, p. 113136, Aug. 2020.
- [4] F. Ménard and P. Cartraud, “Solid and 3d beam finite element models for the nonlinear elastic analysis of helical strands within a computational homogenization framework,” *Computers & Structures*, vol. 257, p. 106675, 2021.
- [5] H. Dandin, A. Leygue, L. Stainier, “Mécanique numérique pilotée par les données pour les comportements anélastiques”, actes du 15<sup>ème</sup> Colloque National en Calcul des Structures, Giens 2022.